



FAN

Fachleute Naturgefahren
Spécialistes des dangers naturels
Specialisti in pericoli naturali



Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Association suisse pour l'aménagement des eaux
Associazione svizzera di economia delle acque

Spécialistes des dangers naturels FAN
Commission pour la protection contre les crues CIPC de
l'Association suisse pour l'aménagement des eaux

Recommandations pour l'évaluation des dangers d'érosion des berges des cours d'eau

Groupe de travail érosion des berges:

Lukas Hunzinger (Flussbau AG SAH)

Annette Bachmann (CSD Ingénieurs SA)

Ralph Brändle (Sektion Naturgefahren Kanton St. Gallen)

Paul Dändliker (division Prévention des dangers OFEV)

David Jud (Meier und Partner AG)

Mario Kokschi (Verkehr und Infrastruktur Kanton Luzern)

Version	Date	Traitement	Validation	Destinataires
V1.0	27.04.14	Lukas Hunzinger		
V1.1	03.07.14	Annette Bachmann		
V1.2	13.07.14	Lukas Hunzinger		
V1.3	15.08.14	Lukas Hunzinger		
V1.4	04.09.14	Lukas Hunzinger		Comité de projet
V1.5	31.10.14	Lukas Hunzinger		Groupe de travail élargi
V2.0	02.02.15	Lukas Hunzinger		
V2.1	19.02.15	Lukas Hunzinger		
V2.2	05.03.15	Lukas Hunzinger Annette Bachmann		Consultation FAN et CIPC
V3.0	30.04.15	Lukas Hunzinger		Pré-tirage symposium CIPC du 05.05.2015
V3.1	04.08.15	Lukas Hunzinger Annette Bachmann David Jud		Version finale
V3.2	05.10.15	Lukas Hunzinger		À publier
V4.0	30.12.19	Brigitte Durindel (Traduction) Annette Bachmann Lukas Hunzinger		Version française
V4.1	19.01.20	Lukas Hunzinger Antoine Magnollay		Version française à publier

TABLES DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	3
2	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	5
2.1	Processus d'érosion latérale	5
2.2	Processus morphologiques	6
2.3	Résistance des berges	7
3	MÉTHODES D'ÉVALUATION DES DANGERS ET LEUR APPLICATION EN SUISSE	9
3.1	Recommandations 1997 – Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire	9
3.2	Consignes dans les cahiers des charges des cantons	10
3.3	Méthodes d'évaluation des dangers	10
4	PROCÉDURE RECOMMANDÉE	13
4.1	Introduction	13
4.2	Définitions	13
4.3	Définition du système	15
4.4	Procédure générale	16
4.5	Scénarios de base	18
4.6	Analyse des points faibles	18
4.6.1	Endroits d'érosion connus	18
4.6.2	Morphologie	18
4.6.3	Cas de charge	21
4.6.4	Sollicitations	24
4.6.5	Résistance à l'érosion	25
4.6.6	Conclusions de l'analyse des points faibles	26
4.7	Analyse des effets	28
4.7.1	Étendue et intensité	28
4.7.2	Probabilité d'occurrence spatiale	30
4.7.3	Processus subséquents	31
4.8	Documentation	31
5	INSTRUCTIONS RELATIVES À L'APPLICATION	33
5.1	GUIDE POUR LES RELEVÉS DE TERRAIN	33

5.2	Incertitudes dans l'évaluation	33
6	SOURCES	35
6.1	Processus	35
6.2	Évaluation des dangers	37
6.3	Autre documentation	38
7	SYMBOLES	39
ANNEXE A	GUIDE POUR LES VISITES DE TERRAIN	
ANNEXE B	EXEMPLES D'APPLICATION : LÜTSCHINE BLANCHE ET TICINO	

1 INTRODUCTION

L'érosion des berges est un processus de danger de peu d'importance en termes de superficie. Son potentiel de danger a cependant été sous-estimé jusqu'à présent. C'est ce qu'a montré notamment l'événement de crue de 2005 en Suisse, où l'arrachement des berges a endommagé voire détruit nombre de bâtiments et d'infrastructures. L'évaluation des dangers d'érosion claire et compréhensible en quantité comme en qualité est une base importante pour la protection des zones bâties et des voies de communication contre l'érosion des berges. Pour évaluer le processus d'érosion des berges, il n'existe aujourd'hui aucune méthode ni base de calcul généralement reconnues.

C'est pour combler cette lacune que les Spécialistes des dangers naturels (FAN) et la Commission pour la protection contre les crues (CIPC) ont mandaté l'élaboration des présentes recommandations. Elles doivent servir de guide pour collecter les données de base sur les dangers et contribuer à uniformiser les évaluations des dangers d'érosion des berges, afin de mieux les comprendre et les comparer. Elles sont destinées aux experts en aménagements des cours d'eaux et des dangers naturels issus aussi bien de la pratique que de l'administration et s'appuient sur les Recommandations fédérales (Loat et Petrascheck 1997). Elles proposent des méthodes qui permettront d'évaluer les dangers d'érosion des berges. Par contre, le choix d'une approche quantitative appropriée pour déterminer l'ampleur de l'érosion des berges est laissé à la libre appréciation des utilisateurs.

Il peut aussi être important de connaître les processus d'érosion pour délimiter l'espace réservé aux eaux. Le procédé présenté ici peut également être utilisé pour compiler les bases utilisées pour délimiter l'espace réservé aux eaux.

Les présentes recommandations ont été élaborées par un groupe de travail composé de représentants de la Confédération, des cantons et de l'économie privée et soumises à la consultation au sein de la FAN et de la CIPC.

Le groupe de travail remercie toutes les personnes qui ont collaboré à cet ouvrage par leurs contributions et l'Office fédéral de l'environnement pour le financement du projet.

2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Processus d'érosion latérale

Le processus de danger d'érosion des berges et la façon d'en tenir compte dans l'évaluation des dangers ont fait l'objet de peu d'études écrites. C'est pourquoi, il est question ici de mettre l'accent sur la description des processus et de leurs conséquences.

Anderson et al. (1975) entendent par **érosion latérale primaire** l'élargissement naturel d'un profil initialement étroit. Toutefois, le chenal élargi présente encore un cours linéaire sur un fond de lit plat. Le chenal s'élargit sur toute sa longueur et atteint un état temporairement stable.

L'érosion du pied du talus déstabilise le terrain situé au-dessus et peut déclencher un **glissement de berge** (voir figure 2, à gauche). Ce phénomène est souvent lié à une érosion en profondeur du lit du cours d'eau. Ce type d'érosion latérale peut se propager très loin et il peut être superficiel ou profond selon les conditions topographiques ou géologiques (Loat et Petrascheck 1997). L'affouillement des berges qui amène des mouvements de terrain induits par la gravitation est souvent également appelé **rupture de talus** (Beck 2006, Requena 2008).

Les causes et les éléments déclencheurs de l'érosion latérale sont assez peu connus, contrairement aux autres processus de danger (Hunzinger et Durrer 2008). Il s'agit souvent d'une combinaison de plusieurs paramètres qui induisent les processus d'érosion (Krapesch et al. 2011).

L'érosion due à l'impact direct du courant est déterminée par la **force tractrice [N/m^2]**. La force du courant attaque surtout le pied de berge et déstabilise le talus situé au-dessus (Requena 2008). Pour qu'il y ait érosion, la force tractrice impactant doit être supérieure à la force tractrice critique de la berge (Beck 2006, Requena 2008). Magilligan (1992) définit dans son ouvrage une valeur limite minimale pour la force tractrice, selon laquelle il faudrait dépasser la valeur de $100 N/m^2$ pour qu'il y ait modification morphologique du chenal d'un cours d'eau. Julian et Torres (2006) pensent que si les berges sont moyennement cohésives, la force tractrice excédentaire (force tractrice supérieure au seuil d'amorce de l'érosion) pendant le débit de pointe d'un événement est l'élément qui détermine l'érosion latérale. Si les berges sont peu cohésives, la variabilité de la force tractrice excédentaire, c'est-à-dire la succession de périodes avec plus ou moins de contraintes, devrait être le paramètre le plus fiable pour prévoir l'érosion latérale.

Diverses études utilisent non pas la force tractrice, mais le paramètre hydraulique de la **puissance d'écoulement [W/m]** (Krapesch et al. 2011, Hunzinger et Durrer 2008, Magilligan 1992, Hickin et Nanson 1984). La puissance d'écoulement est déterminée par des paramètres hydrauliques similaires à ceux de la force tractrice.

L'érosion latérale dépend aussi d'un autre facteur: la **durée de la charge d'écoulement** (Hunzinger et Durrer 2008, Julian et Torres 2006). Il semble évident qu'un événement de longue durée favorise le processus d'érosion latérale.

D'autres paramètres hydrauliques sont examinés dans diverses études pour décrire le processus d'érosion latérale. Le plus souvent, ces études proposent différentes valeurs clés de débit (débit de pointe, hydrogramme, volumes, débit spécifique, etc.) comme variables descriptives (Hasegawa 2013, Henshaw et al. 2012, Hooke 1979).

2.2 Processus morphologiques

Anderson et al. (1975) qualifient d'**érosion secondaire** les processus qui déplacent le chenal, déforment son tracé et amorcent la formation de structures en méandres ou en tresses. Le passage d'un fond de lit plat (après érosion primaire) à un fond de lit structuré produit des courants latéraux qui attaquent la berge (érosion secondaire). La forme que prend alors le chenal dépend de la pente initiale et de la forme du profil en travers après l'érosion latérale primaire. La formation de structures morphologiques dépend essentiellement de **l'apport en charriage** et est donc influencée par les processus dans le bassin versant (présence de sédiment, débit etc.) (Beck 2006, Requena 2008).

Les approches relevant de la morphologie fluviale définissent le style fluvial d'un cours d'eau. Leopold et Wolman (1957) distinguent les styles fluviaux les plus courants: **rectiligne, méandreux et ramifiés**. L'étude de Ahmari et da Silva (2011) fixe des critères pour pouvoir délimiter le passage d'un style fluvial à un autre (voir Figure 1). Les critères de délimitation utilisés sont d'une part le rapport de la largeur du lit B à la profondeur d'écoulement h , et d'autre part le rapport de la profondeur d'écoulement au diamètre moyen des grains d_m . Les formes de chenal sont fortement influencées par le débit, ce qui explique que l'apparence d'un cours d'eau en cas de crue puisse être différente de son apparence en période d'étiage. En cas de débit élevé pendant une crue, le rapport B/h peut par exemple diminuer au point qu'un cours d'eau jusque-là ramifié présente toutes les conditions pour former de bancs alternés ou des méandres (Requena 2008).

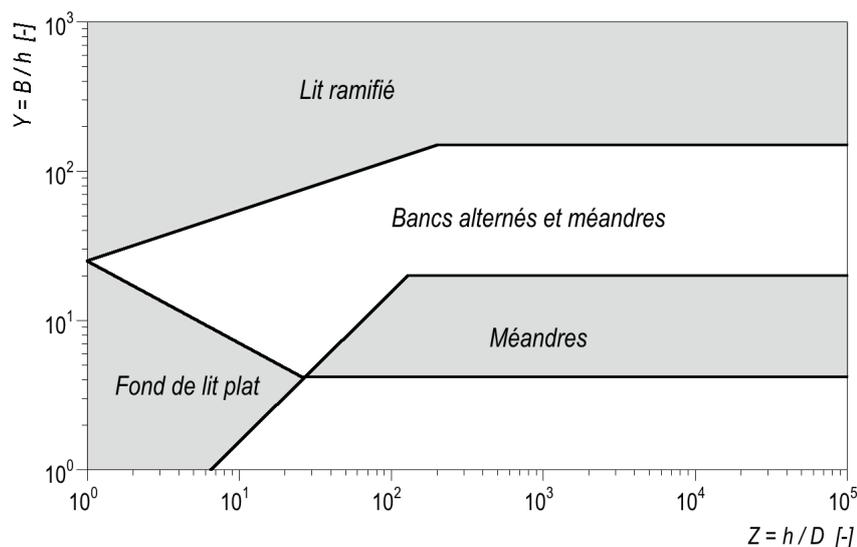


Figure 1: Schéma simplifié de la délimitation du style fluvial en fonction de sa largeur, de la profondeur d'écoulement et du diamètre des grains d'après Ahmari et da Silva (2011).

Des approches selon la **théorie du régime** tentent de déterminer la **largeur d'équilibre** où un chenal reste stable pour un débit donné (Hafner et al. 2004, Schmautz 2003). Il faut néanmoins noter que ce processus a une dimension temporelle toute autre que lorsque le courant attaque la berge. En effet, cette largeur d'équilibre ne s'établit pas après un événement de crue très importante, mais après des événements récurrents ayant un temps de retour de deux à cinq ans (débit approximativement morphogène dans des chenaux à berges non stabilisées) (Bezzola 2014).

Diverses études examinent l'érosion latérale dans le cadre de ces processus morphologiques. Ces travaux traitent de la prévision de la migration des méandres (Dongdong et al. 2010, Hasegawa 2013, Hickin et Nanson 1984), de la largeur maximale du cours d'eau (Eaton 2006, Hafner et al. 2004, Hafner 2008, Jäggi et al. 2011, Jud 2009, Schmautz 2003) et de la détermination de la forme morphologique qui se développe (Ahmari et da Silva 2011, Nagata et al. 2000, Requena 2008).

2.3 Résistance des berges

À partir de quelle force de courant la berge s'érode-t-elle? Cela dépend de la nature des matériaux qui la constituent (granulométrie, cohésion etc.). Les **berges cohésives** présentent une grande résistance grâce à l'interaction électrochimique entre les particules du sol. Ce type de berge ne s'érode qu'après avoir subi une forte charge (Beck 2006, Requena 2008, Schmautz 2003). Dans les berges sans cohésion, plus le diamètre des grains est élevé, plus la résistance est grande. Les éléments les plus gros ne sont généralement pas emportés, ce qui explique qu'avec le temps le pied de la berge est protégé par une **couche de pavage** (Requena 2008).

Les forces de résistance des berges sont en outre fonction du **taux d'humidité** (Amiri-Tokaldany 2003, Beck 2006, Julian et Torres 2006). L'historique météorologique est déterminant ici, tout comme la teneur résultante en eau du sol. Dans les sols saturés, la baisse rapide du niveau d'eau dans le cours d'eau peut déstabiliser une berge.

L'effet de la **végétation** sur les forces de résistance d'une berge est controversé dans la littérature. D'une part, le boisement aux racines profondes est supposé stabiliser le sol et limiter l'érosion (Beck 2006, Requena 2008, Schmautz 2003). Les racines fines ou épaisses maintiennent les matériaux meubles et atténuent le courant près de la berge. De plus, les racines préviennent la formation de tourbillons (Beck 2006). D'autre part, les plantes à système racinaire plat n'empêchent pas l'affouillement et finissent par tomber dans le chenal (Beck 2006, Oplatka 1998), phénomène qui peut aggraver encore l'érosion latérale. Selon Oplatka (1998), l'effet stabilisateur de la végétation dépend de la granulométrie des matériaux de la berge.

L'aménagement des berges pour renforcer un chenal joue un rôle essentiel sur l'apparition d'érosion latérale (Hunzinger et Durrer 2008, Loat et Petrascheck 1997). Comme toutes les mesures de protection, les aménagements des berges doivent être périodiquement contrôlés (Romang 2008). Si les ouvrages ne sont pas intacts ou sont insuffisamment entretenus, leur bon fonctionnement ne peut plus être garanti. Il apparaît des points faibles où les ouvrages risquent d'être endommagés, voire détruits en cas de crue (Loat et Petrascheck 1997).

3 MÉTHODES D'ÉVALUATION DES DANGERS ET LEUR APPLICATION EN SUISSE

3.1 Recommandations 1997 – Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire

Les Recommandations fédérales de 1997 (Loat et Petrascheck 1997) distinguent deux types de processus d'érosion : le glissement des berges dû à l'érosion du pied du versant et le déplacement du lit d'un cours d'eau (voir Figure 2). Le glissement des berges se produit surtout dans les torrents et les cours d'eau de montagne. Sur des terrains plats, les zones particulièrement menacées d'érosion latérale sont celles qui sont très exposées comme les berges concaves, les rétrécissements ou les obstacles dans la section d'écoulement. Sont considérés comme facteurs déterminants de l'érosion latérale d'une part la force du courant et d'autre part la résistance des berges.

L'intensité du processus se mesure à la profondeur de la brèche (mesurée perpendiculairement depuis la surface du talus (d), voir Figure 2). L'intensité est classée en trois niveaux avec les limites indiquées au Tableau 1. Aux endroits menacés par le déplacement du chenal, il faut en outre évaluer l'intensité de l'inondation aux endroits érodés.

Tableau 1: Niveaux d'intensité de l'érosion des berges selon les Recommandations fédérales (Loat et Petrascheck 1997)

Intensité	Profondeur de la brèche (d)
Faible	$d < 0,5 \text{ m}$
Moyenne	$0,5 \text{ m} < d < 2 \text{ m}$
Forte	$d > 2 \text{ m}$

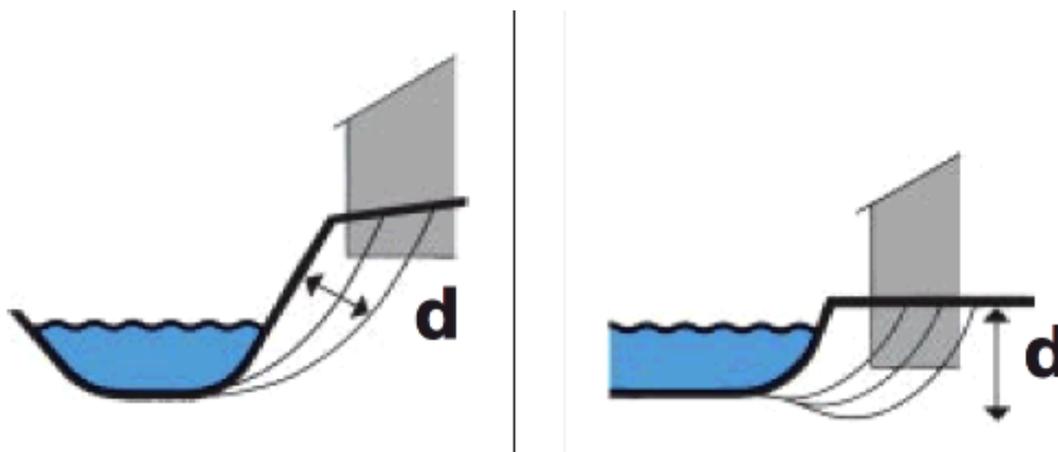


Figure 2: Différence entre glissement des berges (à gauche) et déplacement du lit d'un cours d'eau (à droite).
Source : Loat et Petrascheck 1997, p. 8

3.2 Consignes dans les cahiers des charges des cantons

Le Tableau 2 présente une sélection de cahiers des charges des cantons. Il faut ajouter ici que le processus d'érosion des berges ne fait pas partie de l'évaluation des dangers dans tous les cantons.

Tableau 2: Sélection de cahiers des charges des cantons qui ont réglementé le processus d'érosion des berges. État à fin 2013.

Canton	Indications dans le cahier des charges
AG	Délimitation de l'érosion des berges par évaluation d'experts, sans quantification, au moyen de visites sur le terrain. Prise en compte des zones érodées passées/présentes, des berges exposées, des aménagements etc.
BE	L'érosion des berges est mentionnée dans le cahier des charges mais aucune procédure particulière n'est définie.
BL	L'érosion des berges est prise en compte à titre de processus indicatif et évaluée sur le terrain par évaluation d'experts. Prise en compte des zones érodées actuelles, des berges exposées, des aménagements, etc.
GR	Définition détaillée différenciée pour les torrents, les cours d'eau de montagne et les cours d'eau de fond de vallée avec différents types d'aménagement.
SH	Évaluation de l'érosion des berges au moyen de visites sur le terrain. Contrôle de l'état des ouvrages de protection des berges et prise en compte de la morphologie. L'intensité est toujours forte et la zone de danger est donc indiquée en rouge.
SO	Évaluation de l'érosion des berges au moyen de visites sur le terrain. Contrôle de l'état des ouvrages de protection des berges et prise en compte de la morphologie. L'intensité est toujours forte et la zone de danger est donc indiquée en rouge.
SG	La directive 2003 sur l'analyse des dangers naturels s'appuie sur les Recommandations de Loat et Petrascheck (1997) mais laisse au mandataire le choix de la méthode.
ZH	L'érosion des berges est seulement une indication dans toutes les cartes de dangers.

3.3 Méthodes d'évaluation des dangers

Le groupe de travail a contacté plusieurs bureaux qui avaient traité le thème de l'érosion des berges dans le cadre de la cartographie des dangers. Le Tableau 3 donne un aperçu de toutes les méthodes examinées dans le groupe de travail pour évaluer l'érosion des berges. Des descriptions détaillées des méthodes et une évaluation par le groupe de travail figurent sous Groupe de travail FAN-CIPC Érosion des berges (2014).

Tableau 3: Aperçu des méthodes examinées

Nom de la méthode	Année de la première utilisation	Breve description de la méthode
Méthode Niederer + Pozzi Umwelt AG Cantons d'Argovie et de Schaffhouse	2007	Évaluation d'experts pour chaque temps de retour Endroits d'érosion connus Signes visibles d'érosion latente des berges Prise en compte des berges concaves sans protection contre l'érosion Érosion représentée sur les schémas par des lignes.
Méthode Ingenieure Bart AG Canton de St. Gall, zones 2 à 9	2011	Largeur maximale de l'érosion des berges en fonction de la taille du bassin versant Intensités déduites à partir du SIG et de modèles 2D en fonction de la force tractrice Le renforcement des berges est pris en compte globalement.
Méthode de la commission des dangers (Gefahrenkommission) Canton des Grisons	2002	Évaluation d'experts En fonction du type de cours d'eau Prise en compte du type d'aménagement Avis d'experts
Méthode du canton de Soleure	2002	Inspection sur le terrain de tous les chenaux Évaluation de la nature des berges et des aménagements Prise en compte de l'exposition à l'érosion Intensité toujours forte (danger élevé)
Méthode Flussbau AG SAH Fildrich dans le canton de Berne et Birse dans le canton du Jura	2009	Les endroits de danger sont délimités sur la base d'une visite sur le terrain Critères: morphologie du cours d'eau, capacité d'écoulement, état du renforcement des berges Mise en application des enseignements tirés de l'analyse de l'événement de 2005
Méthode Hunziker, Zarn & Partner AG Petite Emme dans le canton de Lucerne	2010	L'évaluation des dangers s'appuie sur les valeurs empiriques de l'événement de crue de 2005 Prise en compte de l'état des aménagements Largeur d'érosion différenciée par tronçons rectilignes ou par berges concaves
Méthode ATB SA Basse Allaine dans le canton du Jura	2011	Évaluation des dangers seulement en cas de biens à protéger menacés Délimitation des bandes érodées selon la morphologie du cours d'eau Prise en compte de la nature des berges, de l'exposition et du potentiel d'érosion Évaluation au moyen des résultats des modélisations (1D/2D)
Méthode Stucky SA Basse-Areuse dans le canton de Neuchâtel	2009	Calcul de la capacité de transport pour déterminer la largeur maximale du chenal Variation de la pente et de la granulométrie en fonction du scénario Visite sur le terrain pour relever la nature des berges, les aménagements etc.
Méthode Stucky SA Baye de Clarens dans le canton de Vaud	2007	Comparaison de la force tractrice avec la force tractrice critique de la berge pour déterminer la largeur de l'érosion Évaluation des matériaux constituant la berge Prise en compte des aménagements des berges et de leur état
Méthode Marty Ingenieure AG Malbunerbach, FL	2007	Calcul des alignements (état final après événements très rares) Application des calculs de charriage Calcul de l'érosion en profondeur Utilisation des analyses du terrain

4 PROCÉDURE RECOMMANDÉE

4.1 Introduction

La méthode présentée dans ce chapitre réunit des éléments éprouvés issus de pratiques antérieures avec des approches nouvellement élaborées.

Le présent chapitre définit les notions principales, présente une démarche générale et décrit les différentes étapes de l'évaluation des dangers. Selon que le danger d'érosion des berges est évalué au niveau des indications de dangers, de la carte des dangers ou de l'expertise au cas par cas, ce chapitre propose pour chaque étape de travail des méthodes avec différents niveaux de détail.

Pour traiter les cartes des dangers, une procédure approfondie est proposée en plus d'une procédure standard. Elle doit être appliquée aux situations complexes lorsque la procédure standard ne suffit pas pour remplir les exigences d'une carte des dangers. La procédure approfondie nécessite des données de base (p. ex. géométrie du chenal et des ouvrages de protection des berges) d'une qualité supérieure à celles nécessaires à l'évaluation standard. C'est l'affaire du maître d'ouvrage de la carte des dangers de définir quelle procédure est adaptée au cas particulier.

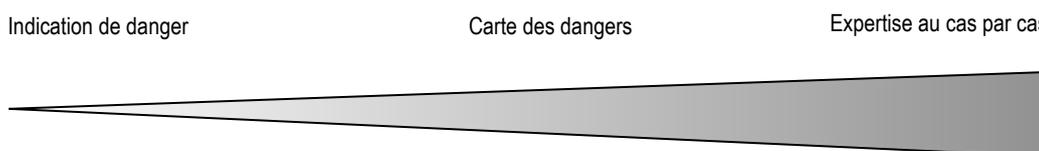


Figure 3: Niveaux de détail de l'étude en fonction du type d'expertise des dangers.

4.2 Définitions

Érosion latérale

L'érosion latérale est un processus lié au cours d'eau où l'érosion/l'arrachement des matériaux constituant la berge conduit à un élargissement ou à un déplacement du chenal. L'érosion latérale peut avoir plusieurs causes. (voir ch. 4.6.3).

Érosion des berges

L'érosion des berges doit être considérée comme un processus de danger que l'on observe en dehors du chenal. Le processus constitue un danger potentiel pour les personnes, les animaux, les constructions et les infrastructures. D'un point de vue physique, l'érosion des berges est identique à l'érosion latérale.

Talus

Terrain en pente délimitant un cours d'eau.

Berge

Partie latérale limitant un cours d'eau. Elle peut être potentiellement modifiée par des processus liés aux cours d'eau.

D'autres définitions de la berge tiennent compte de l'utilisation actuelle ou des qualités écologiques des surfaces qui délimitent le chenal. Ces définitions ne sont pas utilisées ici.

Ampleur de l'érosion

L'ampleur de l'érosion se mesure avec la largeur de l'érosion, sa hauteur et sa longueur (Figure 4). La longueur de l'érosion L_{UE} est mesurée le long de la ligne de rive initiale. La largeur de l'érosion B_{UE} est l'étendue maximale de la niche d'érosion perpendiculairement à l'axe du cours d'eau. La hauteur d'érosion h_{UE} désigne la différence de hauteur entre le lit initial et l'arrête d'arrachement (voir aussi ch. 4.6.3).

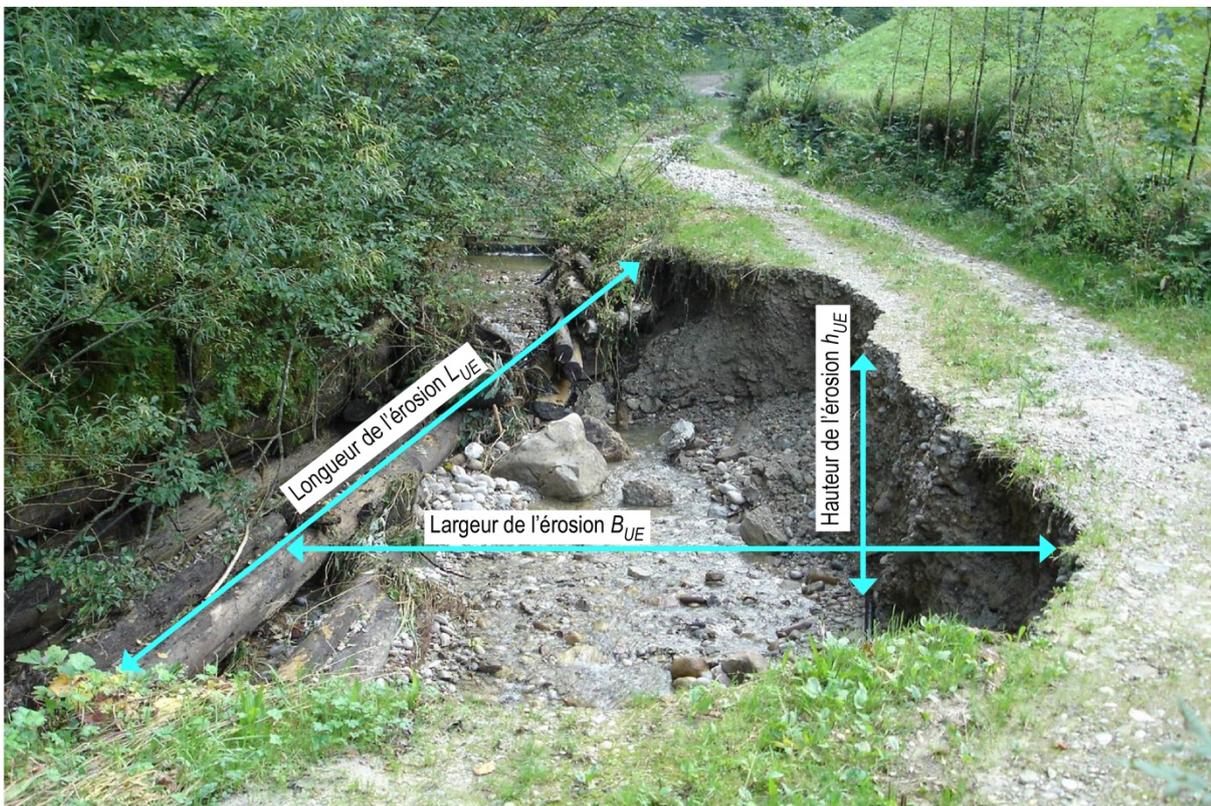


Figure 4: Mesures de l'ampleur de l'érosion. Photo: OFOR 2005

4.3 Définition du système

Cours d'eau examinés

Les présentes recommandations décrivent une procédure qui permet d'évaluer le danger du processus d'érosion des berges de fleuves et de ruisseaux, quelle que soit leur taille ou leur pente. Les approches proposées au ch. 4.6.4 pour quantifier les sollicitations sont généralement conçues pour des cours d'eau de pente moyenne et avec un charriage de type fluvial et ne peuvent pas toujours être transposées à des torrents abrupts à lave torrentielle. Néanmoins, le danger d'érosion des berges dans des cours d'eau abrupts peut être évalué de la même façon à l'aide des présentes recommandations. Selon le type de processus (crue charriant des matériaux solides ou lave torrentielle), d'autres cas de charge sont pertinents (voir aussi ch. 4.6.3).

Différence par rapport à la formation de ravines

Dans les zones d'inondation, les chenaux peuvent s'éroder en cas de forte charge hydraulique. Ce type de formation de ravines en dehors du chenal n'est pas l'objet de la présente méthode recommandée. Toutefois, ces processus doivent être pris en compte pour évaluer les dangers.

Différence par rapport à la rupture de digue

La rupture d'une digue de protection contre les crues peut avoir diverses causes: débordement, érosion interne, berge instable, rupture d'origine hydraulique, etc. De même, l'érosion du pied de la digue par érosion latérale peut entraîner sa rupture. Les points faibles au pied d'une digue peuvent en principe être évalués avec la procédure présentée ici. La rupture due à un tel processus d'érosion ne sera cependant pas traitée dans la méthode recommandée.

Différence par rapport au glissement de terrain

L'érosion du pied de la berge peut entraîner le glissement du talus situé au-dessus. Le processus de glissement et l'érosion latérale doivent être différenciés dans l'estimation des dangers et évalués séparément :

- L'érosion latérale est un processus lié au cours d'eau. Elle est due à l'arrachement direct du pied de la berge ou de la berge par l'eau.
- Le glissement de terrain est un mouvement de masse qui est causé par une défaillance géotechnique du versant.

Toutefois, les deux processus s'influencent mutuellement. D'une part, en cas d'érosion du pied de la berge, le talus devient très abrupte au point que le versant qui se situe au-dessus devient instable. D'autre part, un glissement de terrain apporte beaucoup de matériaux dans le chenal qui protège alors temporairement le pied de la berge de l'érosion (Figure 5).

Il arrive souvent que les processus se différencient aussi dans l'ordre chronologique. L'érosion latérale va de pair avec l'impact du courant et survient pendant un épisode de crue. Le glissement de terrain

peut aussi se produire après un épisode de crue lorsque le glissement du talus qui s'ensuit lui redonne une inclinaison naturelle.

La méthode préconisée ici porte uniquement sur l'érosion latérale qui est causée par un débit accru pendant une crue. Pour évaluer un glissement de terrain, il faut se référer à la méthode pertinente. Si les deux processus sont étudiés par des experts différents, il faut s'assurer qu'ils échangent les évaluations qu'ils ont réalisées.



Figure 5: Différence entre érosion latérale et glissement de terrain. Exemple de la Lüttschine noire à Grindelwald. Photo Nils Hählen.

4.4 Procédure générale

La procédure générale d'évaluation des dangers d'érosion des berges s'appuie sur la pratique de l'évaluation des dangers en Suisse et se divise en trois phases : scénarios de base, analyse des points faibles et analyse des effets (Figure 6). L'analyse des points faibles consiste à définir les cas de charge déterminants à partir de la morphologie des cours d'eau et à évaluer les sollicitations et la résistance des berges. L'analyse des endroits d'érosion connus fournit des indications essentielles sur les processus d'érosion possibles. L'échelle spatiale des processus étudiés diminue avec chaque étape de l'analyse des points faibles. Tandis que les modifications morphologiques et les cas de charge sont examinés sur de grands tronçons de cours d'eau, la charge et la résistance sont étudiées à une échelle très petite.

Si l'analyse des points faibles permet de déceler le danger d'érosion latérale sur un tronçon de cours d'eau, l'ampleur de l'érosion potentielle et sa probabilité d'occurrence spatiale sont déterminées dans le cadre de l'analyse des effets. Il faut enfin clarifier si l'érosion latérale peut elle-même déclencher d'autres processus.

La procédure générale est indépendante du niveau de détail de l'évaluation des dangers. L'analyse des points faibles et l'analyse des effets sont menées séparément pour chaque scénario de base.

Avec la procédure présentée ici, il s'agit essentiellement d'évaluer le danger qui émane d'un seul événement. Lorsqu'une berge a été érodée par une crue, la situation doit normalement faire l'objet d'une nouvelle évaluation. En cas d'événement ultérieur de même ampleur, la charge et la résistance peuvent différer considérablement de la situation de départ.

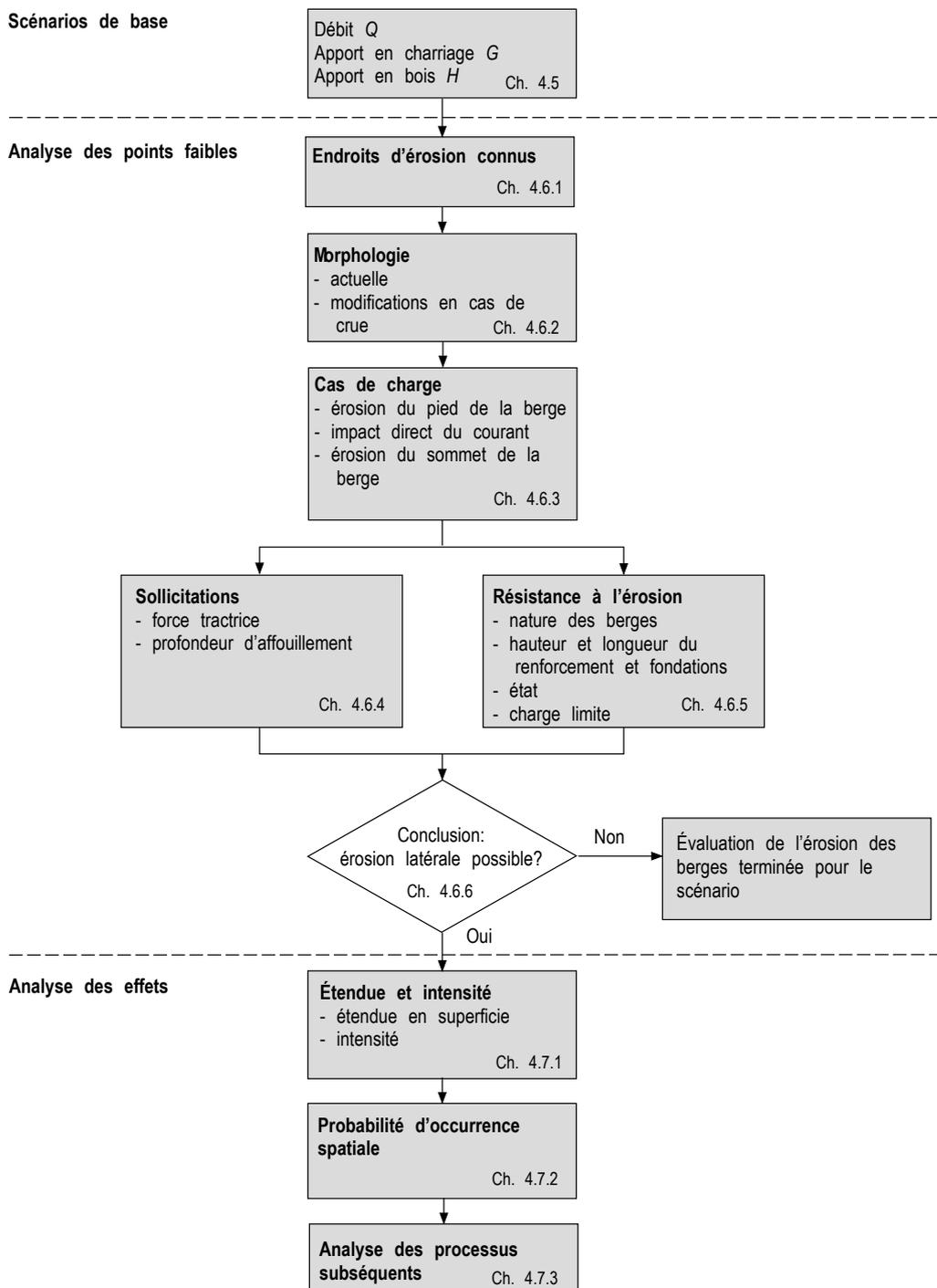


Figure 6: Procédure générale d'évaluation des dangers d'érosion des berges.

4.5 Scénarios de base

La définition des scénarios de base visant à évaluer le danger d'érosion des berges ne diffère pas de la définition des scénarios de base utilisés pour évaluer d'autres dangers liés aux eaux. Il s'agit de déterminer le débit, le charriage et l'apport en bois pour des scénarios de crue avec différentes périodes de retour. Une attention particulière doit être prêtée à la durée des débits de crue et à l'apport en charriage, parce que les processus d'érosion et de dépôt sur le fond du lit influent considérablement les processus liés aux cours d'eau. L'apport en bois prend de l'importance lorsque les embâcles sur les obstacles (p. ex. piliers de pont) peuvent détourner le courant vers la berge.

4.6 Analyse des points faibles

4.6.1 Endroits d'érosion connus

L'étude des endroits d'érosion connus sur les cours d'eau à examiner est essentielle pour évaluer le danger d'érosion des berges. Elle livre des indications sur les zones où l'érosion est possible et sur l'ampleur qu'elle peut prendre, mais elle ne donne pas une image définitive des endroits d'érosion potentiels. Il existe des sources d'information suivantes : le cadastre des événements, les cartes des phénomènes, les photos aériennes et les modèles de terrain, les anciens projets d'aménagement, les visites des lieux ou les observateurs locaux (voir Tableau 4).

Tableau 4: Procédure d'analyse des endroits d'érosion connus.

	Indication de dangers	Carte des dangers	Expertise au cas par cas
Consultation du cadastre des événements	oui, périmètres de processus enregistrés numériquement	oui	oui
Consultation de la carte des phénomènes, des photos aériennes ou des modèles de terrains	–	oui	oui
Anciens projets d'aménagement	–	oui	oui
Visite des lieux	–	oui	oui
Enquêtes auprès des locaux	–	oui	oui

4.6.2 Morphologie

La morphologie du cours d'eau et les processus qui se déroulent dans le chenal (débit, exhaussement, érosion du lit, érosion latérale) sont en interaction permanente. Par conséquent, pour évaluer le danger d'érosion des berges, il faut tenir compte aussi bien de la morphologie actuelle que des modifications qui peuvent se produire pendant une crue. Ainsi, des crues importantes peuvent déclencher des processus morphologiques d'échelle supérieure qui vont modifier foncièrement la morphologie et déplacer le chenal.

En décrivant la morphologie actuelle et les prévisions de modifications morphologiques pendant un événement de crue, il est possible de montrer quels cas de charge doivent être surveillés sur un tronçon de cours d'eau et lesquels peuvent d'emblée être exclus. Par ailleurs, les observations morphologiques donnent des indications sur l'étendue possible des processus d'érosion. Ils seront donc réutilisés pour l'analyse des effets.

Les aspects morphologiques sont importants pour évaluer les dangers d'érosion des berges: le style fluvial (ramifié, méandre, rectiligne), le tracé (rectiligne, courbe) et les modifications de niveau du fond du lit (érosion ou exhaussement). De plus, les irrégularités du chenal doivent être considérées comme causes possibles d'érosion latérale ou d'érosion du lit.

Style fluvial actuel

Dans le cas d'un chenal en tresses, l'érosion latérale peut se produire sur les deux rives et n'est pas forcément la plus importante au moment des débits les plus élevés. La largeur de l'érosion peut atteindre plusieurs fois la largeur initiale du chenal. En première approximation, le cours d'eau avec berges érodées a une largeur qui équivaut à la largeur naturelle du fond du lit. Dans les chenaux à méandres, les berges sont toujours érodées sur le côté extérieur de la courbure et l'érosion est plus importante par débit fort que par débit faible. Avec les méandres aussi, la largeur de l'érosion peut atteindre plusieurs fois la largeur initiale du chenal.

Modifications pendant une crue

Pendant une crue, le chenal peut se déplacer. Dans un même cours d'eau, il peut se former aussi bien des méandres qu'un chenal ramifié (Figure 7). Le style fluvial dépend d'une part du rapport entre la profondeur de l'écoulement et la largeur du lit du cours d'eau et du rapport entre la profondeur de l'écoulement et la granulométrie moyenne (voir explications ch. 2.2). Elle dépend d'autre part du déficit de charriage (tendance aux méandres) ou de l'excédent de charriage (tendance à la ramification). Cette étape doit évaluer quel style fluvial se développerait dans le cours d'eau étudié sans ouvrages de protection des berges.

Tracé

L'érosion latérale dans les tronçons rectilignes est possible sur les deux rives. Sans aucune modification morphologique d'échelle supérieure, les largeurs d'érosion seront en général moindres que dans des chenaux ramifiés ou méandreux. Dans les courbures, l'érosion se produit sur la berge concave située à l'extérieur. Dans de rares cas, lorsque, p. ex., la longueur d'onde d'une courbe de méandre se modifie, l'intérieur de la courbe peut devenir la berge concave.

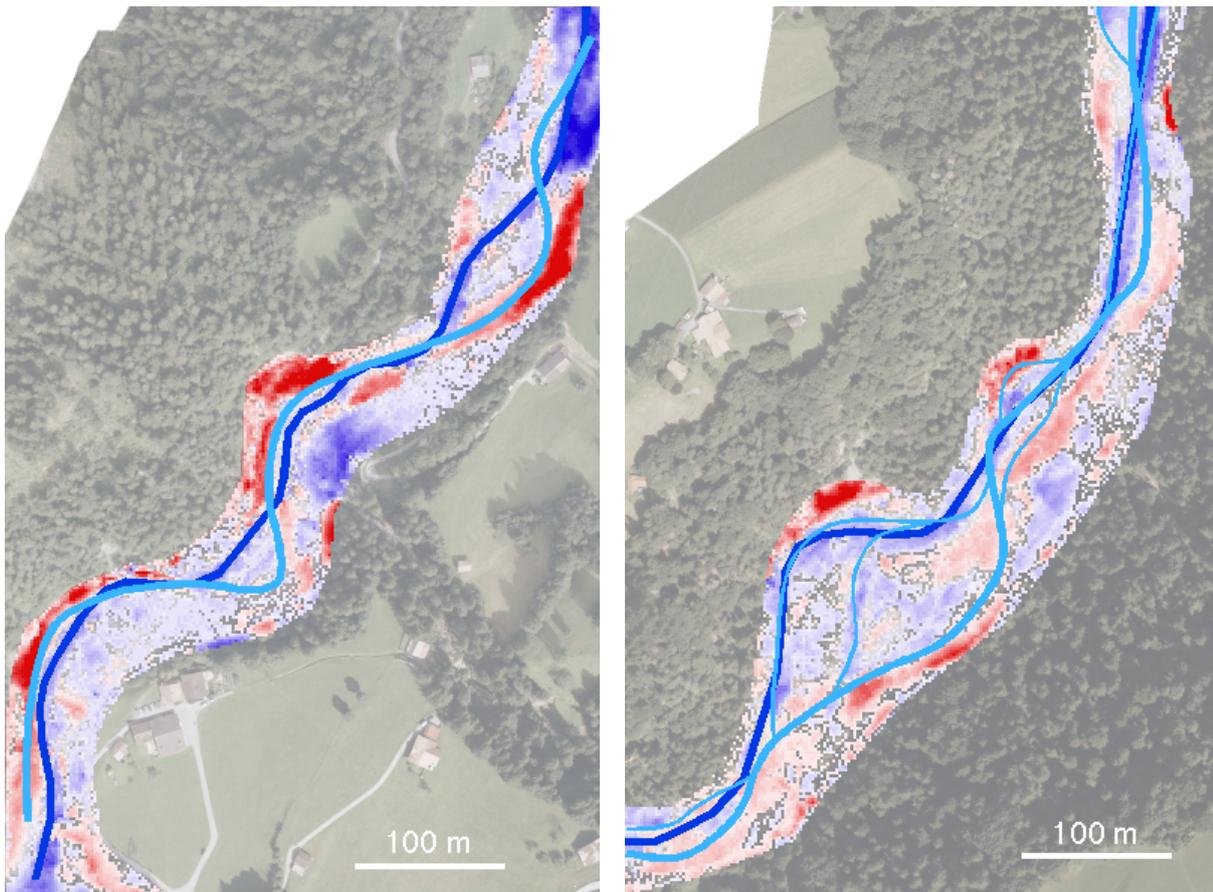


Figure 7: Processus d'érosion latérale (en rouge) pendant la crue de 2005 dans la Chirel à Dientigtal. À gauche, dans les courbes extérieures pendant la formation de méandres, à droite des deux côtés pendant la formation d'un chenal ramifié. Zones bleues: dépôt de sédiments, ligne bleu foncé: chenal avant la crue, ligne bleu clair: chenal après la crue. Direction du courant : de bas en haut et de gauche à droite.

Modifications du niveau du fond du lit

L'érosion et les dépôts au fond du lit modifient l'endroit où une berge subit la sollicitation du courant. Dans un chenal où le fond du lit est érodé, le renforcement des berges peut être affouillé à sa base. Dans un chenal avec dépôt de sédiments en revanche, le renforcement des berges peut être remblayé et donc perdre son effet.

Irrégularités dans le profil en travers

Les irrégularités dans le profil en travers peuvent amorcer des processus d'érosion. Parmi les irrégularités observées, voici les principales: modifications brusques de la rugosité du lit et des berges, des chutes et d'autres ouvrages. Les modifications de direction du cours d'eau sont traitées sous la rubrique Tracé.

Le Tableau 5 présente les procédures à choisir pour aborder la morphologie du cours d'eau dans le cadre d'une évaluation des dangers. La procédure dépend du niveau de détail.

Tableau 5: Procédure d'évaluation de la morphologie.

	Indication de dangers	Carte des dangers	Expertise au cas par cas
Style fluvial actuel	–	Évaluer sur le terrain ou avec une carte ou des photos aériennes.	Évaluer sur le terrain ou avec une carte ou des photos aériennes.
Modification du style fluvial pour un scénario de crue Qx	Toujours supposer une modification.	Évaluer à partir de scénarios de débit et de charriage. Forme potentielle du chenal à partir de cartes historiques.	Évaluer à partir de scénarios de débit et de charriage. Forme potentielle du chenal à partir de cartes historiques et à partir de calculs morphologiques.
Tracé	Toujours supposer des conditions correspondant à une berge concave.	Évaluer sur le terrain ou avec une carte ou des photos aériennes.	Évaluer sur le terrain ou avec une carte ou des photos aériennes.
Modification du fond du lit	Toujours supposer une érosion ou des dépôts.	Évaluer à partir de scénarios de débit et de charriage. <i>Évaluation approfondie :</i> Déterminer les modifications du fond du lit avec des calculs de charriage.	Déterminer les modifications du fond du lit avec des calculs de charriage.
Irrégularités dans le profil en travers	-	Relevés sur le terrain.	Relevés sur le terrain.

4.6.3 Cas de charge

Les processus décrits ci-après peuvent déclencher une érosion latérale et sont donc désignés comme cas de charge. Ils peuvent survenir isolément ou de manière combinée. Il est souvent difficile de les différencier les uns des autres.

Érosion du pied de la berge

Érosion du fond du lit, affouillement ou érosion du pied déstabilisent la berge au point de provoquer son glissement (Figure 8). L'érosion du fond du lit peut survenir à grande échelle ou très localement. Elle peut se manifester sur une longue période ou seulement pendant un unique épisode de crue. Les affouillements peuvent apparaître s'il y a des irrégularités dans le chenal, c'est-à-dire dans les courbures, en cas de changement du profil en travers, en cas de changement de la rugosité ou en cas d'obstacles (barrages, épis, déversements). Les affouillements peuvent apparaître comme un processus secondaire lorsque p. ex. la section d'écoulement est rétrécie par un mur de rive effondré ou par un arbre tombé.

Dans les torrents abrupts, l'érosion du lit est la cause la plus fréquente de l'érosion des berges.

L'érosion des berges, causée par l'érosion du pied, était auparavant désignée comme glissement de berge. Cette notion n'est plus utilisée ici.

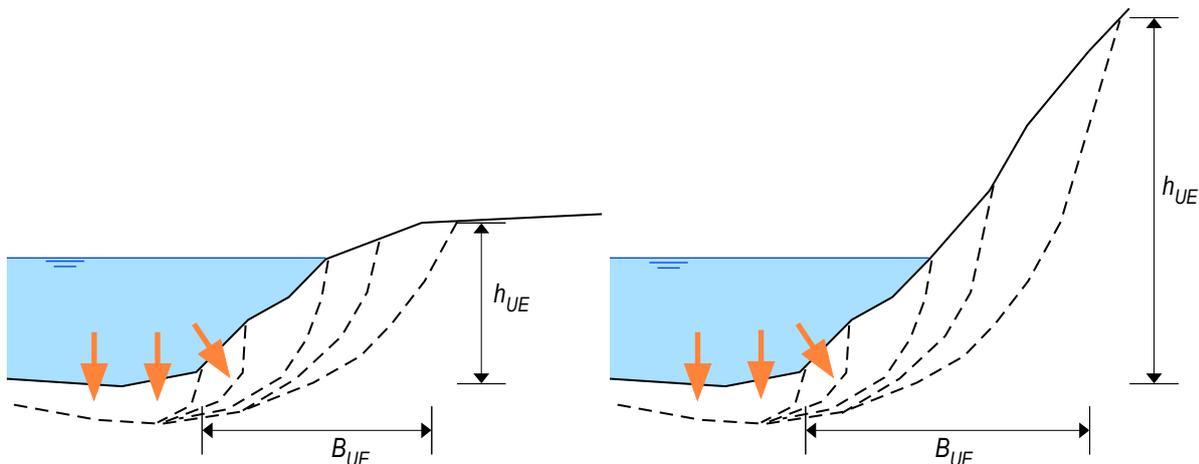


Figure 8: Érosion du lit, affouillement ou érosion du pied déstabilisent la berge (à gauche berge basse, à droite berge élevée).

Impact direct du courant

L'impact direct du courant a pour effet d'arracher les matériaux de la berge (érosion latérale primaire, voir ch. 2.1). Cela peut se produire sur toute la hauteur de la berge (Figure 9 à gauche) ou seulement sur une partie supérieure non aménagée (Figure 9 à droite). L'impact direct du courant frappe le plus souvent sur la partie extérieure des courbures. Il peut néanmoins, comme dans le cas de l'affouillement, résulter d'obstacles dans le cours d'eau.

Les modifications du niveau du fond du lit du cours d'eau pendant un épisode de crue ont pour résultat que le point d'impact se déplace vers le haut ou vers le bas.

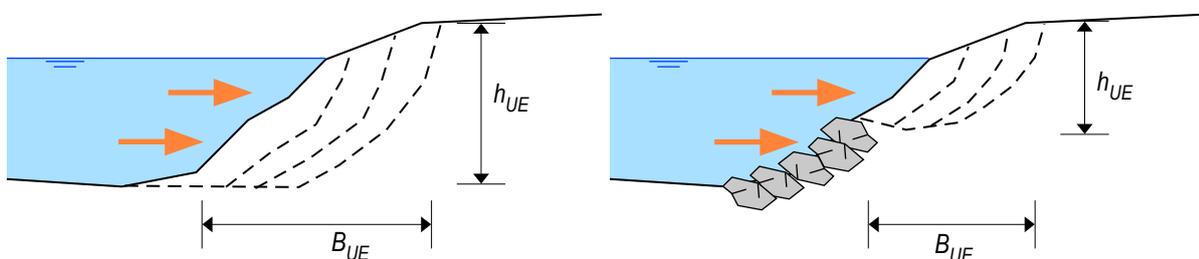


Figure 9: Érosion latérale par impact direct du courant.

Érosion du sommet de la berge

La submersion du sommet de la berge ou le contournement du renforcement de la berge érodent le sommet de la berge (Figure 10). Ce processus d'érosion est lié à l'eau qui déborde du chenal et dépend entre autres facteurs du niveau du fond du lit pendant la crue.

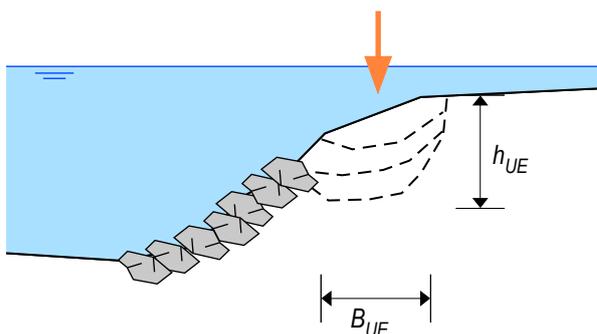


Figure 10: Érosion au sommet de la berge.

Le Tableau 6 donne des indications sur les cas de charge à considérer.

Tableau 6: Procédure pour identifier les cas de charge déterminant l'érosion latérale.

	Indication de dangers	Carte des dangers	Expertise au cas par cas
Érosion du pied de la berge	Toujours considérer	Considérer en cas d'érosion du fond du lit et d'irrégularités dans le profil en travers. Considérer dans les courbures, en cas de ramifications et en cas de formation de méandres.	Considérer en cas d'érosion du fond du lit et d'irrégularités dans le profil en travers. Considérer dans les courbures, en cas de ramifications et en cas de formation de méandres.
Impact direct du courant	Toujours considérer	Considérer pour tous les styles fluviaux et en cas d'irrégularités dans le profil en travers.	Considérer pour tous les styles fluviaux et en cas d'irrégularités dans le profil en travers.
Érosion du sommet de la berge	Toujours considérer	Considérer en cas de submersion de la berge et lors du reflux de l'eau.	Considérer en cas de submersion de la berge et lors du reflux de l'eau.

4.6.4 Sollicitations

Les sollicitations sont estimées pour les cas de charge identifiés comme déterminants dans l'étape précédente. Il est souvent nécessaire de procéder à une expertise qualitative. Les sollicitations doivent être calculées dans les cours d'eau où les conditions hydrauliques en cas de crue peuvent être prévues avec suffisamment d'exactitude (Tableau 7). Une érosion du fond du lit à grande échelle peut être calculée en faisant le bilan de l'apport en charriage avec la capacité de transport. Pour calculer la profondeur des affouillements, plusieurs approches sont citées dans la littérature, p. ex. Tschopp & Bisaz (1972) pour les déversoirs, Peter (1986) ou Kikkawa (1976) pour les courbures, et Zarn (1997) pour les chenaux avec bancs¹. La sollicitation déterminante en cas d'impact direct du courant est la force tractrice sur la berge. En cas d'irrégularités dans le profil en travers, la charge peut être localement bien plus importante que si les conditions de débit sont régulières. Les irrégularités jouent un plus grand rôle dans les petits cours d'eau que dans les grands.

Au niveau Indication de dangers, les sollicitations ne sont pas estimées.

Tableau 7: Procédure d'évaluation de la charge sur la berge.

	Indication de dangers	Carte des dangers	Expertise au cas par cas
Érosion du pied de la berge	-	<p>Évaluation d'experts de l'ampleur de l'érosion du fond du lit et de la profondeur des affouillements. Faire particulièrement attention à la profondeur des affouillements en cas d'irrégularités.</p> <p><i>Évaluation approfondie :</i> Déterminer l'érosion du fond du lit avec un calcul de charriage. Calculer la profondeur des affouillements.</p>	Déterminer l'érosion du fond du lit avec un calcul de charriage. Calculer la profondeur des affouillements.
Impact direct du courant	-	<p>Évaluation d'experts de la sollicitation. Faire particulièrement attention aux pointes de charge dus aux irrégularités.</p> <p><i>Évaluation approfondie :</i> Calculer la force tractrice sur la berge. Évaluer les pointes de charge en cas d'irrégularités.</p>	Calculer la force tractrice sur la berge.
Érosion du sommet de la berge	-	<p>Évaluation d'experts en fonction de l'inondation (p.ex. en fonction de son intensité).</p> <p><i>Évaluation approfondie :</i> Calculer la force tractrice sur le terrain.</p>	Calculer la force tractrice sur le terrain.

¹ Les approches citées sont résumées dans Bezzola (2014)

4.6.5 Résistance à l'érosion

La résistance de la berge à la charge attendue est calculée pour les cas de charge désignés comme déterminants. Il s'agit de relever la nature et l'état de la berge et du terrain alentour. Plusieurs paramètres influent sur la résistance, notamment le type de berge (roche ou matériaux meubles, renforcée ou non), sa composition granulométrique (gravier, sédiments fins, cohésive ou non), sa couverture végétale (superficielle, profonde), sa pente et la profondeur des fondations des aménagements (tableau 8). La résistance de la berge peut être plus faible en cas de transitions entre matériaux rigides et matériaux meubles que si la berge est de nature homogène.

En de nombreux cas, il est nécessaire de faire une expertise qualitative. Notamment, la profondeur des fondations de l'aménagement d'une berge n'est que rarement connue ou ne peut être déterminée qu'au prix d'un travail relativement important.

Tableau 8: Procédure d'évaluation de la résistance de la berge.

	Indication de dangers	Carte des dangers	Expertise au cas par cas
Érosion du pied de la berge	Délimiter roches et matériaux meubles à l'aide de GeoCover de Swisstopo.	Déterminer sur place la nature, l'état et la durabilité du pied de la berge (roche, type d'aménagement, taille des blocs, granulométrie, pente, etc.). Estimer de visu sur place la profondeur des fondations. Décrire en termes de qualité la résistance du pied de la berge. <i>Évaluation approfondie :</i> Ajouter aux relevés précédents: déterminer la profondeur des fondations à partir des plans du projet. Calculer la force tractrice critique du pied de la berge.	Déterminer sur place et vérifier au moyen d'un sondage géotechnique la nature, l'état et la durabilité du pied de la berge (roche, type d'aménagement, taille des blocs, granulométrie, pente, etc.) Calculer la profondeur des fondations à partir des plans du projet ou avec un sondage. Évaluer la sécurité structurale d'un aménagement de la berge (p. ex. un mur de rive) en cas d'affouillement sur une longueur limitée.
Impact direct du courant	Délimiter roches et matériaux meubles à l'aide de GeoCover de Swisstopo.	Déterminer sur place la nature, l'état et la durabilité de la berge (roche, type d'aménagement, taille des blocs, granulométrie, pente, etc.). Décrire en termes de qualité la résistance de la berge à l'impact direct du courant. <i>Évaluation approfondie :</i> Ajouter aux relevés précédents: calculer la force tractrice critique de la berge.	Déterminer sur place et vérifier au moyen d'un sondage géotechnique la nature, l'état et la durabilité de la berge (roche, type d'aménagement, hauteur du renforcement de la berge, taille des blocs, granulométrie, couverture végétale, pente de la berge, etc.). Calculer la force tractrice critique de la berge.

Érosion du sommet de la berge	Délimiter roches et matériaux meubles à l'aide de GeoCover de Swisstopo	Déterminer sur place la nature, l'état et la durabilité du terrain au sommet de la berge (roche, granulométrie, pente, etc.). Décrire en termes de qualité la résistance du terrain à l'impact du courant. <i>Évaluation approfondie :</i> Ajouter aux relevés précédents: calculer la force tractrice critique pour le terrain au-dessus de la berge.	Déterminer sur place et vérifier au moyen d'un sondage géotechnique la nature et l'état du terrain (roche, granulométrie, couverture végétale, pente, etc.). Calculer la force tractrice critique pour le terrain au-dessus de la berge.
--------------------------------------	---	---	---

Si les berges sont renforcées avec des enrochements, la résistance à l'érosion peut être calculée notamment en suivant l'approche de Stevens & Simons (1971). Pour les aménagements de génie biologique, les valeurs limites de la force tractrice sont citées dans la littérature (Tableau 9). Cependant, elles doivent être utilisées avec prudence parce qu'elles s'appuient sur des observations peu nombreuses. Pour calculer la durabilité de l'aménagement de la berge, il faut juger la qualité des matériaux et inclure dans les considérations les effets des modifications du fond du lit à long terme (érosion et exhaussement).

Tableau 9: Valeurs limites de la force tractrice pour génie biologique (Pasche 2000).

	Valeur limite de la force tractrice
Fascines de saules, tapis de branchages	60 N/m ²
Saules, aulnes	100 à 140 N/m ²
Pelouse jeune à bien enracinée	50 à 80 N/m ²

4.6.6 Conclusions de l'analyse des points faibles

En conclusion de cette analyse, les connaissances acquises au cours des étapes précédentes permettent de décider s'il faut supposer ou non l'érosion de la berge dans une zone donnée du cours d'eau. Il s'agit de considérer les cas de charge possibles pour chaque scénario de base et de comparer chaque sollicitation de la berge avec sa résistance (Tableau 10).

Au niveau Indication des dangers, avec l'hypothèse que la sollicitation est toujours plus grande que la résistance il en résulte toujours une érosion de la berge, à moins que le cours d'eau ne soit bordé d'une rive rocheuse.

Dans l'évaluation au niveau Carte des dangers standard, la sollicitation et la résistance sont estimées en termes de qualité. Pour les berges aménagées, l'évaluation sommaire selon Protect (Romang 2008) permet de supposer que la résistance est plus grande que la sollicitation lorsque:

- le renforcement de la berge a une longueur adaptée aux processus d'érosion potentiels,
- le renforcement de la berge a une hauteur suffisante,
- le renforcement de la berge est intact,
- le renforcement de la berge est entretenu régulièrement et

- aucune modification morphologique d'échelle supérieure n'est attendue pour le scénario de crue étudié (voir ch. 4.6.2).

Pour les berges non renforcées constituées de matériaux meubles, la résistance est toujours supposée inférieure à la charge.

Pour une évaluation approfondie au niveau Carte des dangers et dans le cadre des Expertises, la charge et la résistance sont comparées entre elles en termes quantitatifs. Ainsi, la sécurité structurelle de la berge ou du renforcement est prouvé à titre d'évaluation des mesures de Protect.

En de nombreux cas, une décision d'experts est inévitable, même si la base de données est bonne. Il faut en effet une longue expérience pour pouvoir évaluer les processus liés à l'eau.

Tableau 10: Procédure de conclusion de l'analyse des points faibles.

	Indication des dangers	Carte des dangers	Expertise au cas par cas
Érosion du pied de la berge	Toujours supposer une érosion sauf s'il s'agit de roches.	Si la berge n'est pas renforcée, on suppose toujours une érosion de la berge en cas d'érosion du fond du lit ou d'affouillement. Si la berge est renforcée, on suppose une érosion de la berge lorsque l'érosion du fond du lit ou l'affouillement arrivent sous les fondations de l'aménagement de la berge.	Si la berge n'est pas renforcée, on suppose toujours une érosion de la berge en cas d'érosion du fond du lit ou d'affouillement. Si la berge est renforcée, on suppose une érosion de la berge lorsque l'érosion du fond du lit ou l'affouillement arrivent sous les fondations de l'aménagement de la berge, sauf si la construction porteuse de l'aménagement permet un certain affouillement sous-jacent.
Impact direct du courant	Toujours supposer une érosion sauf s'il s'agit de roches.	On suppose une érosion de la berge si les conditions selon Protect (niveau évaluation sommaire) ne sont pas remplies. Toujours supposer une érosion en cas de berges non renforcées constituées de matériaux meubles. <i>Évaluation approfondie :</i> On suppose une érosion de la berge lorsque la force tractrice sur la berge est plus grande que la force tractrice critique.	On suppose une érosion de la berge lorsque la contrainte d'entraînement sur la berge est plus grande que sa force tractrice critique.
Érosion du sommet de la berge	Toujours supposer une érosion sauf s'il s'agit de roches.	Faire une expertise en fonction de l'inondation (p.ex. en fonction de l'intensité de l'inondation). <i>Évaluation approfondie :</i> On suppose une érosion du sommet de la berge lorsque la force tractrice sur le terrain est plus grande que sa force tractrice critique.	On suppose une érosion du sommet de la berge lorsque la force tractrice sur le terrain est plus grande que sa force tractrice critique.

4.7 Analyse des effets

4.7.1 Étendue et intensité

Si l'analyse des points faibles conclut que la berge est menacée par l'érosion, il faut déterminer l'ampleur de cette érosion. Les indications sont obtenues p. ex. avec les études de l'érosion due aux événements de crue passés (Hunzinger et Durrer 2008, Bachmann 2012, Beck 2006) qui ont chiffré les longueurs et les largeurs d'érosion types. Ainsi, pendant la crue de 2005 dans les cours d'eau de montagne où le débit de pointe accusait un temps de retour de plus de 100 ans, les largeurs d'érosion ont atteint jusqu'à quatre fois la largeur du chenal.

Largeur et longueur d'érosion

Dans la pratique, il a été jusqu'à présent judicieux de prendre pour hypothèse que la largeur d'érosion est quatre fois celle du chenal. Les études mentionnées permettent de déduire que la largeur des érosions latérales dues à des processus morphologiques d'échelle supérieure est nettement plus importante que la largeur des érosions dues à des phénomènes locaux (obstacles, irrégularités).

La longueur d'érosion peut être délimitée utilement là où une érosion latérale peut être clairement localisée, c'est-à-dire lorsqu'elle est causée par un obstacle ou qu'elle se produit dans une courbure. Sur les tronçons rectilignes ou sur les tronçons avec ramifications, c'est parfois la berge sur toute sa longueur qui est menacée d'érosion, même si, pendant un événement, la berge n'est pas érodée sur toute sa longueur.

L'ampleur de l'érosion primaire dans les chenaux rectilignes peut être évaluée à partir de la largeur limite. La largeur limite est atteinte lorsque la force tractrice sur la berge est inférieure à la valeur minimale nécessaire pour amorcer le mouvement des matériaux de la berge. Si la force tractrice n'est pas calculée, l'ampleur des érosions peut parfois être déduite à partir de l'observation des événements antérieurs.

Dans les chenaux à méandres, le volume d'érosion dans une courbe est limité par la capacité de transport du cours d'eau. Si la longueur et la hauteur de l'endroit d'érosion sont connues, il est possible de déduire la largeur maximale.

Dans les cours d'eau où des modifications morphologiques d'échelle supérieure sont attendues, il faut appliquer la méthode du Tableau 11, pour déterminer la largeur d'érosion ou l'emplacement des méandres.

Tableau 11: Procédure pour déterminer la largeur d'érosion dans les chenaux ramifiés ou la longueur d'onde et l'amplitude des méandres.

	Indication de dangers	Carte des dangers	Expertise au cas par cas
Tronçon avec chenal ramifié			
Largeur du lit naturelle / largeur de régime	Multiple global de la largeur actuelle du chenal.	Multiple global de la largeur actuelle du chenal. <i>Évaluation approfondie :</i> Déterminer à l'aide de cartes historiques et de calculs morphologiques.	Déterminer à l'aide de cartes historiques et de calculs morphologiques.
Tronçon avec formation de méandres			
Longueur d'onde des méandres	Supposition globale	Supposition globale <i>Évaluation approfondie :</i> Déterminer à l'aide de cartes historiques et de calculs morphologiques.	Déterminer à l'aide de cartes historiques et de calculs morphologiques.
Amplitude des méandres	Multiple global de la largeur actuelle du chenal	Multiple global de la largeur actuelle du chenal. <i>Évaluation approfondie :</i> Déterminer au moyen du bilan volume d'érosion / capacité de transport.	Déterminer au moyen du bilan volume d'érosion / capacité de transport.

Intensité

L'intensité de l'érosion de la berge se mesure à la hauteur de l'érosion h_{UE} . Cette mesure se fait perpendiculairement à partir du sommet de la berge jusqu'au lit de l'endroit d'érosion (Figure 4). Les classes d'intensité utilisées sont celles définies dans les Recommandations fédérales de 1997 (Loat et Petrascheck 1997) (Tableau 12). La classe d'intensité reste la même sur toute la largeur d'érosion. Une érosion des berges de faible intensité ne devrait se produire que dans des cas très rares. Ce n'est que dans les très petits ruisseaux de prairies que la berge a moins de 50 cm de hauteur et la largeur d'érosion y est généralement si minime qu'elle n'est pas désignée explicitement.

La hauteur d'érosion est choisie pour mesurer l'intensité parce qu'elle permet de caractériser les effets de l'érosion de la berge sur un bâtiment. Un bâtiment de fondations normales ne subit aucun dommage pour une hauteur d'érosion de classe d'intensité faible ($h_{UE} < 0.5$ m). Si la hauteur d'érosion atteint la classe d'intensité forte ($h_{UE} > 2$ m), il faut par contre s'attendre à un effondrement du bâtiment (Figure 11). Ainsi, l'attribution de l'intensité du processus de danger d'érosion des berges suit les critères qui sont aussi appliqués pour d'autres types de processus.

Tableau 12: Niveaux d'intensité de l'érosion des berges

Intensité	Hauteur de l'érosion (h_{UE})
Faible	$h_{UE} < 0,5 \text{ m}$
Moyenne	$0,5 \text{ m} < h_{UE} < 2 \text{ m}$
Forte	$h_{UE} > 2 \text{ m}$



Figure 11: La hauteur de l'érosion sert à mesurer les effets de l'érosion des berges sur un bâtiment. Photo Flussbau AG SAH.

4.7.2 Probabilité d'occurrence spatiale

La considération des risques attribue une probabilité d'occurrence spatiale p_{RA} au processus d'érosion des berges. Cette probabilité dépend du style fluvial et du tracé.

La probabilité d'occurrence spatiale est élevée sur les berges concaves. Si le danger d'érosion est attendu sur les deux rives d'un cours d'eau, p. ex. chenal ramifié, la probabilité d'occurrence spatiale est moindre. Le Tableau 13 donne une indication des valeurs possibles avec lesquelles cette probabilité peut être chiffrée. Les valeurs doivent être fixées et justifiées au cas par cas. Si l'emplacement de l'endroit d'érosion probable est évident, c'est la valeur à la limite supérieure qui sera choisie. S'il n'y a aucun indice de l'endroit où l'érosion est la plus probable, c'est une valeur inférieure qui sera choisie pour la probabilité d'occurrence spatiale.

Tableau 13: Valeurs possibles de probabilité d'occurrence spatiale p_{RA} d'érosion des berges.

Style fluvial et tracé	PRA
Berge concave	0,50 - 1,00
Chenal rectiligne	0,10 – 0,50
Berge concave dans un méandre	0,50 - 1,00
Ramification	0,25 - 0,75

4.7.3 Processus subséquents

L'érosion latérale dans un cours d'eau peut déclencher d'autres processus:

- Des matières solides sont mobilisées (charriage, arbres et arbustes, objets déposés sur la berge), qui sont ensuite transportés vers l'aval où ils déclenchent de nouveaux processus de dangers dus aux dépôts ou aux embâcles.
- L'érosion du pied d'une berge haute déclenche un glissement de la pente ou accélère un glissement en cours.
- Dans le chenal élargi par l'érosion latérale, la capacité de transport diminue et le charriage et le bois flottant s'accumulent dans le lit.

L'évaluation des dangers doit étudier la possibilité de ces processus subséquents et leurs effets. Selon les circonstances, la personne en charge de l'évaluation doit faire appel aux spécialistes des autres disciplines.

4.8 Documentation

Les données relevées, les hypothèses, les calculs et les réflexions qui constituent l'évaluation des dangers d'érosion des berges doivent être documentés dans un rapport technique, comme c'est le cas pour toute évaluation des dangers. Ce rapport doit résumer et retracer les réflexions fondamentales, les hypothèses, les résultats et les incertitudes (voir ch. 5.2).

Si le résultat de l'évaluation est consigné sur une carte (carte d'intensité, carte des dangers ou carte des indications de dangers), les zones menacées d'érosion doivent être représentées en surfaces. Si les surfaces sont trop petites pour être identifiées à l'échelle choisie, il est possible d'opter pour un graphique de lignes. En ce cas, la largeur d'érosion doit être reconnaissable par un symbole.

Si des zones inondables et des surfaces menacées d'érosion figurent sur la même carte, il faut utiliser des symboles qui permettent de différencier les surfaces concernées par les différents processus. La Figure 12 présente les différents symboles possibles.

Dans le modèle de données d'un système d'information géographique, les surfaces doivent être dotées du type de processus « érosion des berges ». De plus, il est renvoyé ici aux modèles de géodon-

nées de la Confédération et des cantons. Le modèle de géodonnées de la Confédération prescrit impérativement des éléments de surfaces et non des lignes.

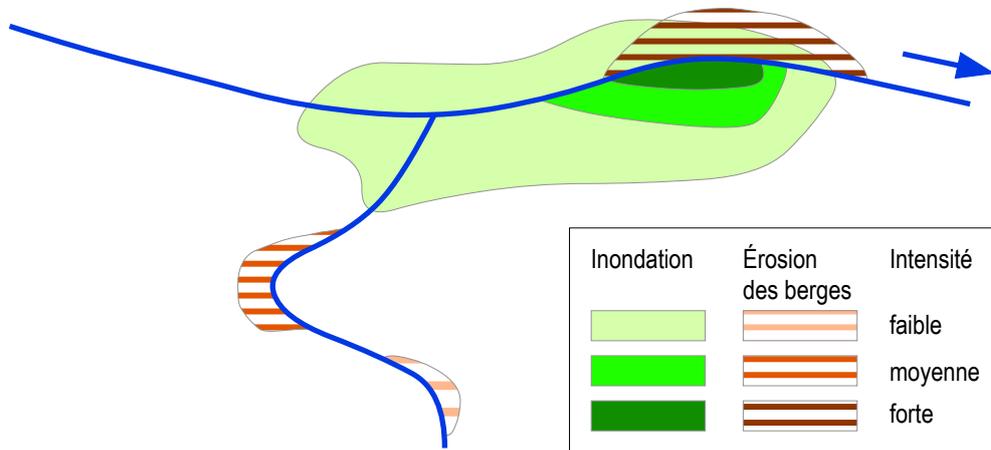


Figure 12: Représentation possible de surfaces d'érosion potentielles dans une carte d'intensité Eaux selon les niveaux de la Confédération.

5 INSTRUCTIONS RELATIVES À L'APPLICATION

5.1 Guide pour les relevés de terrain

Plusieurs des étapes expliquées au chapitre 4 sur l'évaluation des dangers d'érosion des berges nécessitent une évaluation sur le terrain. En général, deux visites sur le terrain sont nécessaires. La première dans le cadre de l'analyse des points faibles qui permet d'évaluer l'apparition de processus possibles et de relever la nature de la berge. La seconde, dans le cadre de l'analyse des effets afin d'estimer l'ampleur de l'érosion ou de vérifier une ampleur calculée.

L'annexe contient un exemple de guide qui peut être utilisé comme aide-mémoire pour les relevés sur le terrain. Les utilisateurs sont tenus de le compléter en fonction des conditions locales ou spécifiques au projet. Il est recommandé avant les relevés de terrain de préparer les bases indiquées au Tableau 14.

Tableau 14: Bases pour préparer les relevés de terrain.

Matériel cartographique	Plan général 1:5000 ou plus grand Réseau hydrographique 1:5000 ou plus grand Cartes géologiques (atlas, cartes géotechniques etc.) Carte des phénomènes
Relevés/indications/indices existants d'autres projets/dossiers ou du cadastre des événements	Indications tirées du projet Écomorphologie (largeur du lit, aménagements) Plans des ouvrages réalisés dans le tronçon correspondant Étude(s) avec indications ou recherches des tendances à l'exhaussement, à l'équilibre ou à l'érosion. autres
Scénarios de base	Scénarios de crue Q_x Volume de charriage G_x Apport en bois H_x

5.2 Incertitudes dans l'évaluation

Comme toute évaluation des dangers, l'évaluation de l'érosion des berges est entachée d'incertitudes. Cela est d'autant plus vrai que l'évaluation s'appuie sur très peu d'expériences collectives et qu'une évaluation d'experts est souvent indispensable. Les incertitudes peuvent apparaître dans les cas suivants :

- En déterminant les sollicitations : dans un chenal rectiligne et uniforme, les contraintes d'entraînement sont aisément prévisibles en tant que sollicitation déterminante. Dans les profils en travers irréguliers et par courant variable, il survient des pics de charge qui sont difficilement quantifiables.
- En déterminant la résistance à l'érosion : la résistance à l'érosion des ouvrages homogènes est plus simple à déterminer que la résistance de berges structurées. De plus, la profondeur des fondations d'un ouvrage est souvent inconnue.
- En tirant les conclusions de l'analyse des points faibles : si la charge est à peu près égale à la résistance, la probabilité d'une mauvaise décision est plus grande que si l'on peut supposer que

- la charge est en tous les cas bien supérieure ou bien inférieure à la résistance de la berge.
- En analysant les effets : l'étendue de l'érosion des berges peut être mal évaluée lorsque le sous-sol a une composition autre que celle supposée. Elle peut p. ex. être surestimée si le sous-sol est rocheux ou elle peut être sous-estimée si on ne sait pas que le sous-sol est composé de couches de matériaux fins et érosifs.

Si le but de l'évaluation des dangers est d'établir une carte des dangers pertinente pour l'aménagement du territoire, on supposera, en cas de forte incertitude, qu'il y a érosion des berges et les surfaces menacées seront délimitées en calculant large, notamment parce que la carte des dangers doit représenter différentes manifestations d'un événement.

Un moyen de déceler les incertitudes qui entachent une évaluation et de peut-être les réduire, est l'application de différentes méthodes pour traiter les différentes étapes. En de nombreux cas, l'imprécision de l'évaluation peut être réduite en éliminant les incertitudes dans les bases, surtout celles sur la nature de la berge, grâce à des enquêtes détaillées. Il faut toutefois veiller à garder un certain équilibre entre le travail supplémentaire nécessaire et l'amélioration de la pertinence.

6 SOURCES

6.1 Processus

Anderson A.G., Parker G. et Wood A. 1975. The flow and stability characteristics of alluvial river channels. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory. Rep. No. 161.

Ahmari H. et da Silva A.M.F. 2011. Regions of bars, meandering and braiding in da Silva and Yalin's plan. J. of Hydraulic Research. Vol. 49, No. 6, pp. 718-727.

Amiri-Tokaldany E., Darby S.E. et Tosswell P. 2003. *Bank stability analysis for predicting reach scale land loss and sediment yield*. Journal of the american water resources association, 897-909.

Bachmann A. 2012. *Ausmass und Auftreten von Seitenerosionen bei Hochwasserereignissen*. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern.

Beck J.R. 2006. *Streambank erosion hazard mapping: concepts, methodology and application on the Venoge river (Switzerland)*. École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne.

Bezzola G.R. 2014. Vorlesungsskript Flussbau, Professur für Wasserbau, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.

Dongdong J., Xuejun S., Wang H. et Zhou G. 2010. *Three-dimensional modeling of bank erosion and morphological changes in the Shishou bend of the middle Yangtze River*. Advances in Water Resources 33, 348-360.

Duan J.G. 2005. *Analytical Approach to Calculate Rate of Bank Erosion*. Journal of hydraulic engineering ASCE, 980-990.

Eaton B.C. 2006. *Bank stability analysis for regime models of vegetated gravel bed rivers*. Earth Surface Processes and Landforms 31, 1438-1444.

Ercan A. et Younis B.A. 2009. *Prediction of Bank Erosion in a Reach of the Sacramento River and its Mitigation with Groynes*. Water Resources Management 23, 3121-3147.

Hafner T. 2008. *Uferrückbau und eigendynamische Gewässerentwicklung – Aspekte der Modellierung und Abschätzungsmöglichkeiten in der Praxis*. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München.

Hafner T., Schindler M. et Schmautz M. 2004. *Wertach Vital – Eigendynamische Gewässerentwicklung – Vergleich zwischen numerischer Simulation und Wirklichkeit*. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München.

Hasegawa K. 2013. *Studies on Qualitative and Quantitative Prediction of Meander Channel Shift*. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University.

Henshaw A.J., Thorne C.R. et Clifford N.J. 2012. *Identifying causes and controls of river bank erosion in a British upland catchment*. Catena 100, 107-119.

Hickin E.J. et Nanson G.C. 1984. *Lateral Migration Rates of River Bends*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, N° 11, 1557-1567.

- Hooke J.M. 1979. *An analysis of the processes of river bank erosion*. Journal of Hydrology, 42, 39-62.
- Hunzinger L. et Durrer S.: *Seitenerosion*. dans Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008. *Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Umwelt-Wissen Nr. 0825: 429 S.
- Jäggi M., Hunziker R. et Arborino T. 2011. *Auswirkungen der 3. Rhonekorrektion auf Geschiebehaushalt und Flussmorphologie*. Wasser Energie Luft, 2-2011, 122-127
- Jud D. 2009. *Élargissements dynamiques naturels du lit de la Kander à Heutstrich Sud*. École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne.
- Julian J.P. et Torres R. 2006. *Hydraulic erosion of cohesive riverbanks*. Geomorphology 76, 193-206.
- Kikkawa H., Ikeda S. et Kitagawa A. 1976. *Flow and Bed Topography in Curved Open Channels*. Proc. ASCE, J. of Hydr. Div. 102(HY9), 1327-1342.
- Krapesch G., Hauer C. et Habersack H. 2011. *Scale orientated analysis of river width changes due to extreme flood hazards*. Natural Hazards and Earth System Sciences 11, 2137-2147.
- Leopold L.B. et Wolman M.G. 1957. *River Channel Patterns: Braided, Meandering and Straight*. Geological Survey Professional, Paper 282-B.
- Loat R. et Petrascheck A. 1997. *Recommandation 1997. Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*. Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE), Office fédéral de l'aménagement du territoire (OFAT), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEPF).
- Magilligan F.J. 1992. *Thresholds and the spatial variability of flood power during extreme floods*. Geomorphology 5, 373-390.
- Nagata N., Hosoda T. et Muramoto Y. 2000. *Numerical Analysis of River Channel Processes with Bank Erosion*. Journal of hydraulic Engineering, 243-252.
- Oplatka M. 1998. *Stabilität von Weidenverbauungen an Flussufern*. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.156.
- Parker G. 1978. *Self-formed straight rivers with equilibrium banks and mobile bed. Part 2. The gravel river*. Journal of Fluid Mechanics, Vol 89, part 1, 127-146
- Pasche E. 2000. *Wasserbau*. Skript zur Vorlesung, Technische Universität Hamburg, zitiert in Bezzola 2014.
- Peter W. 1986. *Kurvenkolk - Untersuchung über die Sohlensausbildung in Flusskrümmungen*. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 85.
- Piégay H., Darby S.E, Mosselman E. et Surian N. 2005. *A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion*. River Research and Applications 21, 773-789.

Requena R. 2008. *Seitenerosion in kiesführenden Flüssen – Prozessverständnis und quantitative Beschreibung*. Mitteilung 210, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Hrsg. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.

Romang H. (Ed.) 2008: Wirkung von Schutzmassnahmen. Teil F Flüsse. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 289 S.

Schmautz M. 2003. *Eigendynamische Aufweitung in einer geraden Gewässerstrecke*. Bericht Nr. 96 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München.

Schmautz M. 2004. *Gravel river widening by bank erosion in a straight stretch of river – investigations on a numerical model*. River Flow 2004 – Greco, Carravetta & Della Morte (eds.), 99-107.

Stevens M.A. et Simons D.B. 1971. Stability Analysis for Coarse Granular Material on Slopes. River Mechanics, Shen H.W. (ed.), Fort Collins, Colorado, 17-1 - 17-27.

Tschopp J. et Bisaz E. 1972. *Profundidad de erosión al pie de un vertedero para la aplicación de corrección de arroyos en quebradas empinadas (Erosion depth at weir toe for the application of river corrections at steep canyons)*. 5. Congreso Latinoamericano de Hidraulica, IAHR, Lima, PE

Zarn B. 1997. *Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität*. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 154.

6.2 Évaluation des dangers

ATB SA. 2011. Carte des dangers crues Basse Allaine. Coeuvette, Vendline.

Amt für Umwelt, Kanton Solothurn. 2012: Leitfaden zur Erstellung von Gefahrenkarten, Version 11.1.

Basellandschaftliche Gebäudeversicherung 2009. Pflichtenheft Naturgefahrenkarten Basel-Landschaft.

Baudirektion Kanton Zürich, AWEL. 2011. Gefahrenkartierung Naturgefahren im Kanton Zürich – Hochwasser. Pflichtenheft 2011

Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Raumentwicklung, Kanton Aargau. 2007. Submissionsunterlagen und Leistungsverzeichnis Gefahrenkarte Hochwasser Oberes Reusstal, Beilage 7 (Erfassen der Seitenerosion).

Flussbau AG / geo7. 2009. Technischer Bericht Gefahrenkarte Diemtigen.

Gefahrenkommissionen, Amt für Wald und Naturgefahren des Kantons Graubünden. 2002. Merkblatt Gefahrenzonenausscheidung für Prozess Ufererosion.

Hunziker, Zarn & Partner. 2010. Gefahrenkarte Kleine Emme - Technischer Bericht. Bau-, Umwelt und Wirtschaftsdepartement, Dienststelle Verkehr und Infrastruktur. Kanton Luzern.

IG Teilgebiete 2+3 (Bart-Beffa-Louis-Philippona & Brügger). 2011. Technischer Bericht Methodik Gefahrenkarte Teilgebiet 2+3, Kanton St. Gallen

IG Teilgebiete 4-9 (Bart-Beffa-Louis-Philippona & Brügger). 2013. Technischer Bericht Methodik Gefahrenkarte Teilgebiete 4-9, Kanton St. Gallen

Naturgefahrenkommission (NGK) des Kantons St. Gallen. 2003. Wegleitung Naturgefahrenanalyse im Kanton St. Gallen, Version 2003.

Romang Hans (Éd.) 2008: Efficacité des mesures de protection. Plate-forme nationale « Dangers naturels» PLANAT, Berne, 289 p.

Stucky SA. 2007. Rapport d'expertise – établissement de la carte des dangers liée à la Baye de Clarens au lieu-dit « Les Bonnettes ». Canton de Vaud, Tribunal administratif.

Stucky SA. 2009. Étude des dangers naturels liés à l'eau – Secteur de la Basse-Areuse et du Sud du Canton. Rapport technique – cours d'eau. République et canton de Neuchâtel.

Tiefbauamt, Kanton Schaffhausen. 2005. Angebotsunterlagen für Ingenieurarbeiten zur Erstellung der Gefahrenkarten für den Kanton Schaffhausen, Teilgebiet 1.

6.3 Autre documentation

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). 1998. Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Écomorphologie niveau R (région). OFEFP, Berne.

FAN-KOHS Arbeitsgruppe Ufererosion. 2014. Bisherige Praxis bei der Beurteilung der Gefahr der Ufererosion an Fliessgewässern in der Schweiz. Unveröffentlicht. 43 S.

7 SYMBOLES

Symbole	Unité	Signification
<i>B</i>	[m]	Largeur du lit
<i>B_{UE}</i>	[m]	Largeur d'érosion
<i>d</i>	[m]	Profondeur de l'érosion selon les Recommandations fédérales (Loat et Petrascheck 1997)
<i>d_m</i>	[m]	Diamètre moyen des grains
<i>h</i>	[m]	Profondeur d'écoulement
<i>h_{UE}</i>	[m]	Hauteur d'érosion
<i>L_{UE}</i>	[m]	Longueur d'érosion
<i>Q</i>	[m ³ /s]	Débit
<i>G</i>	[m ³]	Apport en charriage
<i>H</i>	[m ³]	Apport en bois
<i>p_{RA}</i>	[-]	Probabilité d'occurrence spatiale
<i>Y</i>	[-]	Largeur relative du cours d'eau (=B/h)
<i>Z</i>	[-]	Profondeur d'écoulement relative (=h/d _m)